干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

民勤绿洲不同土地利用类型下土壤水盐的空间分布特征分析①

柳 菲， 陈沛源， 于海超， 马金珠
（兰州大学资源环境学院，西部环境教育部重点实验室，甘肃 兰州 730000）

摘 要：以石羊河流域下游——民勤绿洲为研究区域，通过野外采样、实地调查和实验分析，对不同土地利用类型下（耕地、林地、草地、湿地、盐碱地、撂荒地和荒漠）土壤的水盐特征进行研究，结果表明研究区土壤含水率整体偏低，范围为 5.35% ~20.58%，土壤含盐量的平均值为 47.02 g·kg^{-1}，盐渍化程度严重。土壤含水率和含盐量表现为中等变异性，说明其易受到气候、地形、水文地质以及人为活动的影响。不同土地利用类型下土壤水盐的垂直分布差异显著，土壤含水率在垂直方向上的变化特征较为复杂，但含盐量在垂直方向上主要表现为“表聚型”和“振荡型”。民勤绿洲各土层土壤水盐的水平分布均呈条带状分布，土壤含水率整体表现出西高东低，南高北低，而土壤含盐量则表现出相反的趋势。

关 键 词： 民勤绿洲；土壤含水率；含盐量；空间分布
文章编号：

土壤是地球系统的重要组成部分，是大气圈、水圈、生物圈和岩石圈相互联系的重要纽带，处于生态环境系统的核心地位，是人类生产生存的基础和宝贵资源。由于其所处地位的特殊性，因此土壤的结构特征、物质组成以及理化性质，都是地理环境变迁的信息载体[1]。21 世纪以来，人类在进行生产生活时对土地资源的不合理利用导致水土流失、土壤污染、土地退化以及土壤盐渍化、荒漠化等一系列问题，不仅对生态环境造成恶劣的影响，也对人类的生产生活带来巨大的损失[2]。在干旱区，土壤是绿洲植被生长的载体，土壤质量的好坏直接影响着绿洲植被的生长，进而影响绿洲生态系统的稳定性[3]。地下水作为干旱区绿洲水资源的主要补给来源，是绿洲植被生长与繁衍的主导因子，但近年来由于大量开采地下水资源，导致地下水位不断下降，水质矿化度升高，土地荒漠化、盐碱化面积大幅增加，严重影响了干旱地区生态环境和经济的可持续发展[4-5]。

民勤位于石羊河流域下游，处于巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠的中间，是阻挡两大沙漠合并的屏障。在绿洲外围生长着很多防风固沙的植被，它们的存在有助于延缓民勤的沙漠化，但随着人类对区域水资源的盲目过度开采，固沙植物开始大面积的死亡，严重影响了民勤绿洲荒漠生态系统的稳定以及绿洲内部的可持续发展。因此，越来越多的学者也开始关注民勤的生态问题，陈丽娟等[6]发现民勤绿洲土壤含水量西南高、东北低，含盐量从南到北、由西向东逐渐增大。彭鸿嘉等[7]对民勤荒漠区植被演替特征及其影响因素进行了分析研究，发现人类活动导致地表径流大幅减少，大量开采地下水使地下水位急剧下降是植被退化的根本原因。李丹等[8]基于民勤绿洲耕地荒地退耕还林地对土壤水分、养分和盐分进行了研究，发现土地利用方式对土壤性质的影响显著。基于前人的研究结果，本文通过对不同土地利用类型下土壤的水盐特征进行分析，旨在为民勤绿洲土壤盐渍化和荒漠化的防治以及荒漠植被恢复提供依据，同时为有效利用土地资源提供科学的指导。

① **收稿日期：**2019-04-13； **修订日期：**2019-07-22
基金项目：兰州大学中央高校基本科研业务费专项基金创新人才培养项目（lzujbky-2019-kb49）资助
作者简介：柳菲（1994-），女，汉族，甘肃庄浪人，硕士研究生，主要从事干旱区水文与水资源方面的研究. E-mail：fliu16@lzu.edu.cn.
通讯作者：马金珠（1968-），男，汉族，甘肃静宁人，教授博导，主要从事干旱区水文与环境的研究与教学工作. E-mail：jzma@lzu.edu.cn

1　研究区概况

民勤绿洲位于38°05′~39°06′N,103°02′~104°02′E,地处河西走廊东端石羊河下游,东、西、北三面被巴丹吉林和腾格里两大沙漠包围,南部是红崖山和阿古拉山。由于地处西北内陆,降水少蒸发大,形成了典型的大陆性荒漠气候,多年平均降水量为115 mm,降水季节分配不均匀,主要集中在夏季;年平均蒸发量为2 643.90 mm,干燥度为6.26($K>4$,特干旱),是全国极端干旱地区之一。石羊河是民勤唯一的地表径流,但近年来由于大气环境的变化以及上中游人类活动的影响,石羊河在民勤境内的径流量逐年递减。研究区平均海拔1 400 m,主要地貌有沙漠、低山丘陵和平原。土壤类型主要有灰棕漠土、草甸土、盐土和风沙土,在长期灌溉和施肥耕作的影响下形成了特殊的绿洲灌耕土。民勤因受地形影响,四季多风,年平均风速为2.8 $m \cdot s^{-1}$,大风多集中在春季,年风沙天气多达213 d,浮沉和沙尘暴天气多达37次左右,气候环境恶劣,给人民的生产生活带来了巨大的损失。

民勤县总面积为1.6×10^4 km^2,绿洲面积为0.144×10^4 km^2,仅占总面积的9%,其中耕地面积为0.064×10^4 km^2,占总面积的4%。农业比较发达,主要种植小麦、玉米,还有苜蓿、枸杞、瓜类等经济作物。天然植被有白刺、柽柳、沙蒿,另外还有人工栽植的梭梭、沙枣、花棒等植物。

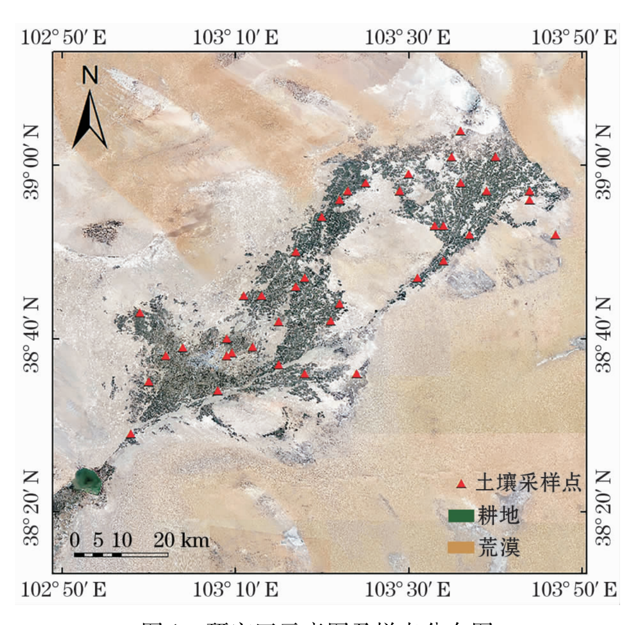


图1　研究区示意图及样点分布图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area and sample distribution

2　材料与方法

2018年8月于民勤绿洲采集耕地、林地、湿地、草地、荒漠、盐碱地、撂荒地和天然林地40个剖面,用土钻钻取土样,剖面深度为100 cm,样品间隔为25 cm,为避免水分流失,立即将样品密封在聚乙烯袋中带回实验室测量土壤含水率和含盐量,并用GPS定位,记录样点周围的植被、作物的生长状态、灌溉情况以及耕作制度。土壤含水率通过将样品在110 ℃下烘箱干燥12 h来测定,含盐量测定采用水土比(5:1)烘干残渣法[9]。所有实验分析均在兰州大学西部环境重点实验室完成。所有数据用Excel进行统计分析,用sigmaplot和surfer软件绘制土壤水盐的空间分布图。

3　结果与分析

3.1　土壤剖面平均水盐含量

土壤水分是限制干旱半干旱地区植被生长和分布的主要因素,绿洲荒漠区植被生长所需水分主要来源于大气降水和灌溉水,此外,地下水和大气凝结水也是土壤水分的主要来源[10-11]。土壤水分除了受降水强度、土壤蒸发、风等气象因素以及地形地质的影响外,还受地下水埋深、植被类型等要素的影响[12]。对不同土地利用类型下土壤剖面平均水盐含量进行统计分析(表1),发现湿地的土壤含水率最高,为20.58%,耕地次之,为13.37%,接下来依次为盐碱地(11.39%)、林地(9.78%)、撂荒地(7.22%)、天然林(7.03%)、草地(5.95%)和荒漠(5.35%)。湿地在干旱区分布极少,其土壤水分含量最高,主要是因为湿地地势低洼,附近人为的大水漫灌造成局部积水,排水不畅导致土壤含水率较高。耕地次之,可能是由于受灌溉影响,且农田土壤以砂壤土为主,经过长时间的下渗及储蓄,土壤含水率较高。盐碱地表面虽然无植被生长,但是其土壤质地黏重,持水性强,且土壤表层的钙积层阻碍了水分的蒸发,导致其土壤含水率高[13]。人工林土壤含水率较高是因为林地表层覆盖有5 cm厚的腐殖质,土壤肥沃,土质为壤质砂土,持水性较好,枯枝落叶也增加了土壤的保水能力[14]。干旱地区天然植被的土壤水分主要受气候条件、土壤质地和地下水的埋藏深度等因素影响[15]。干旱荒漠区降水少,蒸发量大,土壤质地以砂土为主,地下水就成为土壤水的主

要补给源。天然林和撂荒地大多分布于绿洲——荒漠过渡带,其在生态质量上既低于绿洲又低于荒漠,称之为“生态裂谷”[16],而且由于人类活动过度破坏,地下水开采严重,潜水水位下降,导致植被退化严重,土壤含水率低。草地的土壤含水率低,主要是因为近年来随着民勤人口的不断增加,大面积的草地被开垦成耕地,但由于土地质量低,耕种一两年又被弃耕,于是表面生长了低盖度的盐生草,在蒸发的作用下土壤含水率较低。而荒漠地表裸露,无植被覆盖,土壤蒸发作用剧烈,导致含水率很低。

土壤中的水溶性盐类是地球上各种岩石风化的产物,在大气降水、地表水、土壤水和地下水的作用下,经过溶解、沉淀、迁移、积累等一系列物理、化学和生物过程,风化物中的可溶性盐类被重新分配并且在土壤中积累形成土壤盐分[17]。土壤中的水溶性盐类是造成土壤盐渍化的重要因素,土壤盐分含量过高会抑制植物根系吸收水分和养分的能力,更甚者则会腐蚀植物根系,从而影响植物的正常生长和发育[18-19]。因此,研究土壤盐分的大小和分布有助于了解土壤盐渍化的程度和特征,从而改善和恢复生态环境[20]。对不同土地利用类型下土壤剖面的平均含盐量进行统计分析,结果如表 1 所示。土壤含盐量的变化是:天然林的土壤含盐量最高,为 106.55 $g \cdot kg^{-1}$,盐碱地的土壤含盐量次之,为 104.88 $g \cdot kg^{-1}$,然后是撂荒地(88.91 $g \cdot kg^{-1}$)、荒漠(55.00 $g \cdot kg^{-1}$)、草地(12.44 $g \cdot kg^{-1}$)、耕地(4.74 $g \cdot kg^{-1}$)、人工林(2.61 $g \cdot kg^{-1}$)和湿地(0.99 $g \cdot kg^{-1}$)。天然林主要包括梭梭林、沙枣林和胡杨林,属于典型的盐生植被,抗干旱耐盐碱能力强,在长期的生长过程中形成了特有的耐盐结构[21],因此土壤含盐量高。盐碱地由于研究区气候干旱,降水少而蒸发强烈,地表有钙质结核,因此大量盐分会积聚在土壤表层,导致土壤含盐量高。撂荒地大多处于绿洲荒漠过渡地带,由于当地灌溉制度的不合理,大水漫灌之后强烈的蒸发导致土壤含盐量高,养分低,植被长势差,大量耕地最后发展成撂荒地。荒漠大多靠近沙漠,地表裸露,无植被覆盖,含盐量较高,但相比绿洲荒漠过渡地带稍低。研究区草地为低密度草,土壤质地为砂土,土质疏松难以保存水分,土壤水分由土壤空隙上升至表层而损失,盐随水走,因此土壤含盐量较低。耕地的含盐量低于其他土地主要是因为耕地经过长时间的耕作种植,土壤质地得到很大的改良,含盐量较低,有利于农作物的生长。人工林包括杨树培育林和刺槐,土壤含盐量低,杨树和刺槐作为防风固沙的优势物种,能降低林内的风速,减少土壤的水分蒸发,同时也抑制土壤的返盐作用,而且杨树和刺槐根系较为发达,吸收土壤中的部分盐分,所以其土壤含盐量低。湿地土壤含盐量低主要是因为土壤水对盐分的稀释作用。由此可见,植被可以有效的降低土壤的含盐量,而且长期的耕作可以有效的改良土壤结构和土壤质量。

不同土地利用类型下土壤含水率和含盐量均服从正态分布,满足地统计学分析的要求,可以直接对数据进行变异系数的计算。变异系数(Cv)是描述变量特征的重要指标,反映了变量的离散程度。根据变异系数的大小,当 $Cv < 10\%$ 时为弱变异性;$10\% < Cv < 100\%$ 为中等变异性;当 $Cv > 100\%$ 时为强变异性[22]。不同土地利用类型下土壤含水率的变异系数差异显著,变化范围为 32.3% ~ 102.14%,除天然林地出现强变异性,其他土地利用类型下土壤含水率均表现出中等变异性。土壤含盐量除撂荒地为弱变异性、人工林土壤为强变异性,其他土地利用类型下土壤含盐量都呈现中等变异。这说明研究区土壤盐分受区域微地形、局地小气候、土地利用方式及耕作制度等因素影响较大。

3.2 土壤剖面垂直水盐含量

从图 2 中可以看出,不同土地利用类型下土壤含水率的垂直分布差异显著。耕地、湿地和天然林地土壤含水率随深度的增加而增大,主要是因为采样时间为 8 月中旬,农作物已进入收获阶段,农田灌溉次数减少,且夏季气候炎热,蒸发强烈导致土壤表层水分散失速度快,因此表层土壤含水率较低,土层越深土壤含水率越高。湿地在民勤的分布极少,其含水率整体很高,而且从表层往下水分含量逐渐增加,主要是因为地势低洼,排水不畅,水分逐渐下渗,导致底层土壤含水率高。而天然林地土壤含水率整体偏低,主要是因为荒漠植被生长主要靠降水和地下水补给,民勤地区降水稀少而蒸发强烈,所以天然植被的生长主要依赖地下水,地下水在毛管力的作用下上升,表层土壤因蒸发强烈而含水率低。人工林土壤含水率在垂直方向呈 S 型波动,可能是受人为灌溉影响,且植被对水分的吸收利用大所致。草地和荒漠的土壤含水率随深度的增加均呈现先增大后减小的趋势,草地由于在土壤内部出现干土层,降

表 1　土壤含水率和含盐量统计分析

Tab. 1　Statistical analysis of soil water content and salinity

统计值	耕地		林地 人工林		林地 天然林		湿地		草地		荒漠		盐碱地		撂荒地	
	含水率 / %	含盐量 / g · kg^{-1}	含水率 / %	含盐量 / g · kg^{-1}	含水率 / %	含盐量 / g · kg^{-1}	含水率 / %	含盐量 / g · kg^{-1}	含水率 / %	含盐量 / g · kg^{-1}	含水率 / %	含盐量 / g · kg^{-1}	含水率 / %	含盐量 / g · kg^{-1}	含水率 / %	含盐量 / g · kg^{-1}
最大值	22.04	11.08	15.19	5.90	17.25	150.71	28.72	1.77	9.56	20.13	12.11	123.39	17.29	157.07	13.42	99.25
最小值	5.24	0.75	4.83	0.90	0.86	60.55	16.99	0.65	3.50	2.75	2.84	15.41	5.57	41.31	3.85	80.59
极差	16.80	10.33	10.36	5.00	16.39	90.16	8.73	1.52	6.06	17.38	9.27	107.98	11.72	115.75	9.57	18.66
平均值	13.37	4.74	9.78	2.61	7.03	106.55	20.58	0.99	5.95	12.44	5.35	55.00	11.39	104.88	7.22	88.91
标准差	4.32	2.81	5.19	2.85	7.18	37.96	4.13	0.52	2.92	8.14	4.14	43.10	5.86	58.71	5.37	9.49
变异系数	32.30	59.18	53.09	109.26	102.14	35.62	20.08	53.17	49.06	65.37	77.43	78.36	51.47	55.98	74.46	10.68
分布类型	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

雨产生的淋溶作用至干土层处被抑制,因此土壤含水率呈现两头低中间高的特征。荒漠土壤质地以砂土为主,土质疏松,降雨后水分由地表向下运移,同时在毛细血管作用下地下水又向地表运移,因此表现为上部和下部土壤含水率低,而中间高的特点。盐碱地和撂荒地土壤含水率随深度的增加呈现先减小后增大的趋势,盐碱地表层土壤含水率最高,这可能是由于盐碱地表面的钙积层有效地减少了水分的蒸发,且土质黏重持水性好,因此 0 ~ 50 cm 土壤含水率较高。撂荒地表层有一层砂黄土,持水性能略好于砂土,因此从 30 cm 以下土壤含水率显著降低,这说明由于土壤的分层使得分层界面上下存在较大的势能梯度[23],下层的水分向上运移,在表层蒸发。

研究区土壤含盐量除了耕地、草地和湿地,其他土地利用类型下土壤含盐量均呈现"表聚"的现象,而且盐分均随深度的增加而减少,这符合干旱区土壤盐渍化的特点。民勤绿洲全年降水量很少,在高温的季节,由于强烈的蒸发作用使土壤中的水分在毛管力的作用下向上运移,水分蒸发、盐分结晶析出,在土壤表面积聚。耕地土壤含盐量呈现先增大后减小的趋势,50 ~ 75 cm 土壤含盐量最高,这种现象为"盐分振荡型",这可能是受到耕作、施肥、灌溉等活动的影响,盐随水动,灌溉水带着盐分下渗并在底部积聚致使底层土壤含盐量较高;草地和湿地土壤含盐量呈现先减小后增大的趋势,此类特征的土壤可能处于脱盐和积盐的中间状态,土壤盐分不稳定。因此可以看出,民勤绿洲土壤盐分在垂直方向上主要表现为"表聚型"和"振荡型"。

3.3　土壤水盐的空间插值分析

为了更直观地反映民勤绿洲土壤水盐的分布特征,通过 surfer 软件进行克里金插值,并绘制土壤水盐空间分布图,如图 3、4 所示。等值线的密集程度反映了土壤水盐的空间变异性[24]。

民勤绿洲土壤含水率整体表现出西高东低,南高北低,而土壤含盐量则整体表现出相反的趋势。这与陈丽娟等[6]的研究结果一致。从不同土层土壤水盐的水平分布图可以看出,土壤含水率在水平方向上的变异程度随土层深度的增加而增大,而不同土层的土壤含盐量在水平方向上的变异程度差别不大。由图 3 可以看出,研究区土壤含水率主要是西高东低,南高北低,可能是由于民勤绿洲水资源多依靠地下水补给,沿地下水流方向(由西南向东北),地下水位逐渐降低。0 ~ 25 cm、25 ~ 50 cm 土层含水率的水平分布特征较一致,高值中心分布在西南方向,低值区分布在西北和东部边缘。主要是因为西北和东部地区靠近巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠,沙漠化效应影响较大,因此土壤含水率低;而西南部为绿洲耕作区,土地利用以小麦种植为主,长期耕作导致土壤质地松软,而且灌溉水源充足,因此土壤含水率一直保持在较高的水平。50 ~ 75 cm 和 75 ~ 100 cm 土壤含水率在水平方向分布趋势大致相同,高值中心向北偏移,但坝区和泉山区含水率空间变异较大。

土壤含盐量的水平分布较为杂乱,土壤原生盐渍化的长期积累以及农业活动灌溉洗盐的反复影响,使盐分随水分蒸发积聚于地表,遇灌溉水和雨水

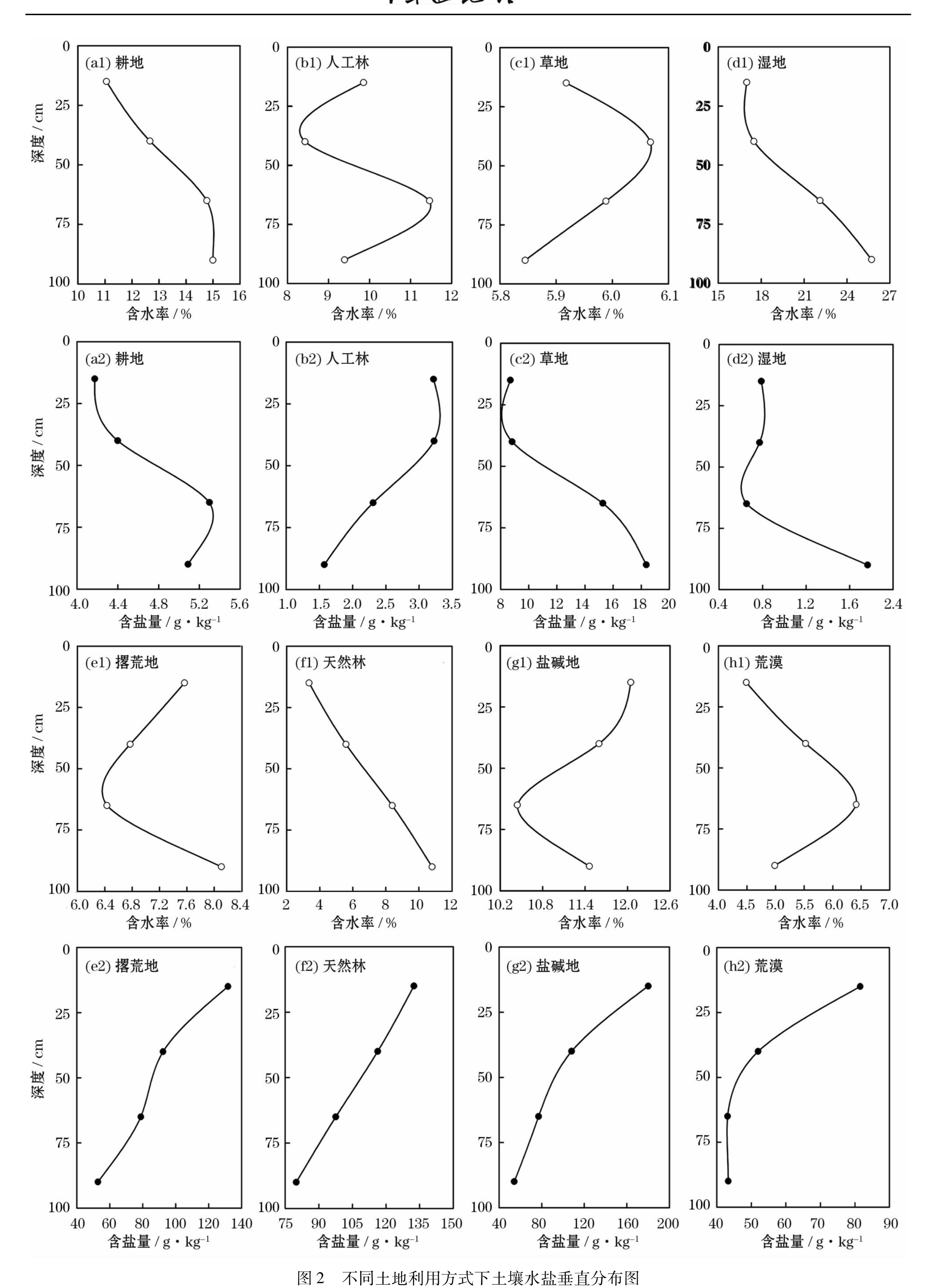


图 2　不同土地利用方式下土壤水盐垂直分布图

Fig. 2　Vertical distribution of soil water and salt under different land use types

图 3　不同土层土壤水分空间分布图

Fig. 3　Spatial distribution of soil moisture in different soil layers

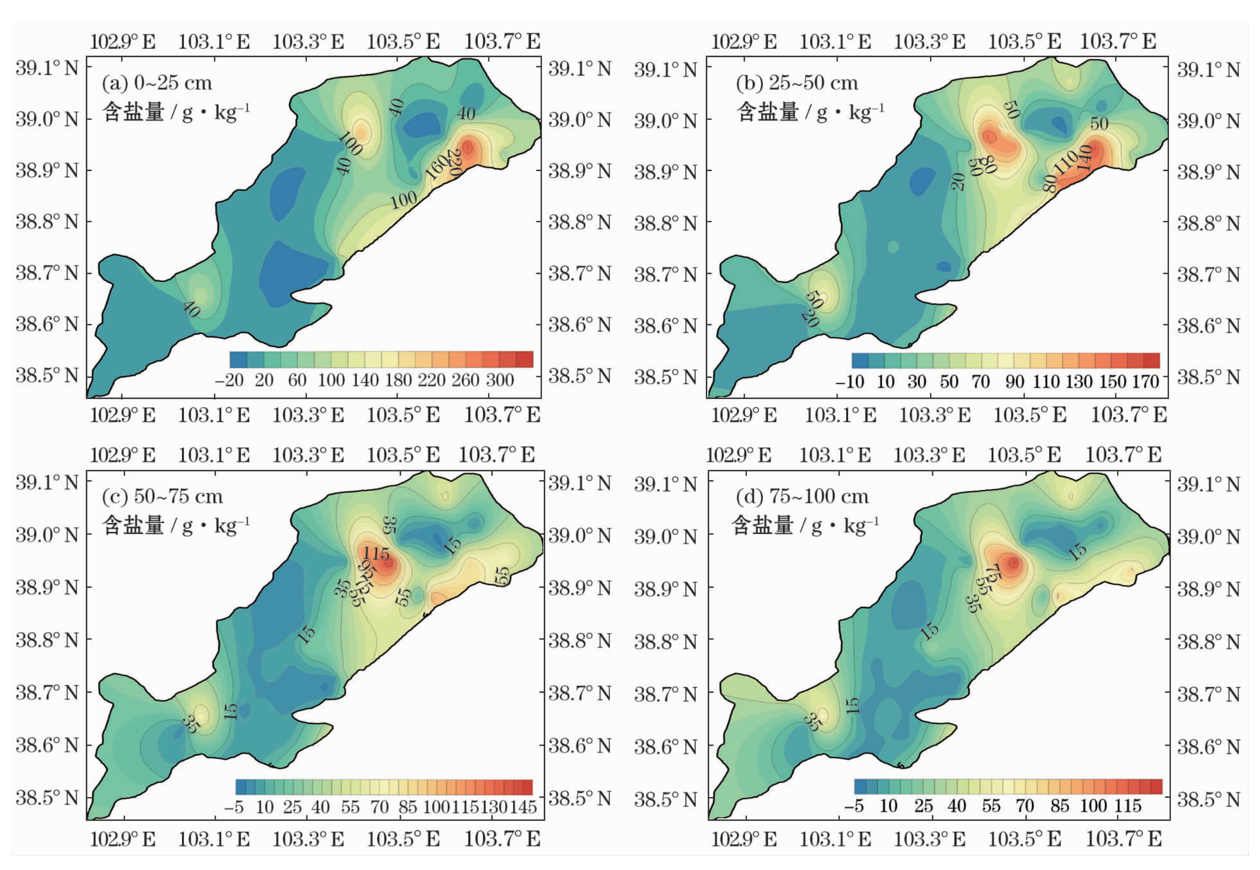


图 4　不同土层土壤盐分的空间分布图

Fig. 4　Spatial distribution of soil salinity in different soil layers

又随之下渗，反复交替，导致其分布特征比较复杂[25]。研究区土壤含盐量整体表现出北高南低，东高西低的趋势，如图4，0～25 cm 和25～50 cm 的分布规律相似，北部地区含盐量高于南部，可能是因为民勤地表径流逐年递减，大量开采地下水进行灌溉的结果。而沿经度方向土壤含盐量由西向东的增加趋势较纬度方向更明显，在东部边缘区含盐量达到最高。综上所述，民勤绿洲湖区的土壤含盐量明显高于坝区和泉山区，一方面是由于湖区处于绿洲的下游，上中游的土壤盐分随水流迁移到下游积累，导致盐分含量高；另一方面是由于区域土地利用方式的差异导致，坝区和泉山区的土地利用方式主要是耕地，而湖区主要是天然林地和荒地，地表植被稀疏，蒸发强烈，土壤水分含量低，土壤盐渍化过程显著，导致土壤盐分含量高。

4 讨论与结论

4.1 讨 论

干旱地区土壤的水盐特征直接影响植被的生长和分布，而植被的生长与分布对土壤的水盐也有一定的影响。土壤水盐的空间分布特征为土壤盐渍化的防治以及合理利用土地资源提供依据，盐渍化土壤的形成与当地的自然条件（气候、地形、水文地质、土壤、植被）和人为活动（不合理的灌溉制度、过度放牧、大量开垦土地）密切相关[26－28]。有研究[29－31]发现，天然植被0～60 cm 土壤含盐量高于人工植被（小麦、棉花和水稻），这表明人为种植在一定的程度上可改善土壤的盐渍化程度，主要是因为种植作物一方面增加了地表的覆盖度，减少土壤水分的蒸发，另一方面农田灌溉水下渗将表层盐分带走，可以减少盐分的积累。除了盐碱地之外，民勤绿洲整体表现出有植被覆盖的比少植被或无植被覆盖的土壤含水量高，而土壤含盐量低的特征；而且人工植被的土壤含盐量表现出底聚的特征，天然植被的土壤含盐量呈现表聚的特征，这也表明人类的耕作有利于改良土壤，使整个剖面呈现脱盐的特征。而且之前有研究也得出在作物生长期通过灌溉进行适度淋洗可以有效地抑制土壤盐分的积累[32]。因此，如何规划土地耕作种植，利用先进的灌溉技术改良土壤的水盐状况，既满足作物对水分的需求，又能减少土壤中盐分的积聚，对干旱地区盐碱地改良具有重要意义。

4.2 结 论

研究区土壤含水率整体偏低（5.35%～20.58%），含盐量的平均值为47.02 g·kg^{-1}，土壤盐渍化程度相当严重。土壤含水率和含盐量均属于中等变异，说明其易受到气候、地形、水文地质以及人为活动的影响。大多数土壤剖面的含水率随着深度的增加而增大，但含盐量在垂直方向上的变化特征较为复杂，主要表现为表聚型和振荡型。土壤含盐量的变异程度明显大于含水率的变异程度，说明土壤含盐量的空间依赖性大于土壤含水率；表层土壤水盐的变异程度均较大，说明表层土壤水盐易受外界因素（气候、地形和人为活动）的影响。但随着土层深度的增加，外界因素的影响逐渐减弱，致使土壤水盐在垂直方向上的变异强度逐渐减小。民勤绿洲各土层土壤水盐的水平分布均呈条带状分布。土壤含水率整体表现出西高东低，南高北低，而土壤含盐量则整体表现出相反的趋势。

参考文献（References）

[1] ACOSTA-MARTINEZ Veronica, ZOBECK Ted M, VIVIEN Gore Allen. Soil microbial, chemical and physical properties in continuous cotton and integrated crop-livestock systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6): 1875－1884.

[2] 于天仁. 我国农业持续发展和生态环境中重大土壤问题的化学机理研究建议[J]. 土壤, 2001, 33(3): 119－122. [YU Tianren. Suggestions on the research of chemical mechanism of sustainable development of agriculture and major soil problems in ecological environment in China[J]. Soils, 2001, 33(3): 119－122.]

[3] 祖康祺. 土壤[M]. 北京：科学普及出版社, 1986. [ZU Kangqi. Soil[M]. Beijing: Science Popularization Press, 1986.]

[4] 塔西甫拉提·特依拜, 张飞, 丁建丽, 等. 干旱区典型绿洲盐渍化土壤空间信息研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(4): 544－551. [TIYIP Tashpolat, ZHANG Fei, DING Jianli, et al. Spatial information on salination of typical oases in arid areas[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(4): 544－551.]

[5] 邓宝山, 瓦哈甫·哈力克, 党建华, 等. 克里雅绿洲地下水埋深与土壤盐分时空分异及耦合分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(3): 599－607. [DENG Baoshan, HALIK Wahap, DANG Jianhua, et al. Coupled analysis of spatio-temporal variability of groundwater depth and soil salinity in Keriya Oasis[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(3): 599－607.]

[6] 陈丽娟, 冯起, 成爱芳. 民勤绿洲土壤水盐空间分布特征及盐渍化成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(11): 99－105. [CHEN Lijuan, FENG Qi, CHENG Aifang, et al. Spatial distribution of soil water and salt contents and reasons of saline soils' development in the Minqin Oasis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(11): 99－105.]

[7] 彭鸿嘉, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 甘肃民勤荒漠区植被演替特征及

驱动力研究——以民勤为例[J]. 中国沙漠,2004,24(5):628 －633. [PENG Hongjia, FU Bojie, CHEN Liding, et al. Study on features of vegetation succession and its driving force in Gansu desert areas: A case study at Minqin County[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(5):628 －633.]

[8] 李丹,张勃,戴声佩,等. 民勤绿洲耕地荒地退耕还林地土壤肥力及物理特性比较研究[J]. 土壤,2011,43(3):398 －405. [LI Dan, ZHANG Bo, DAI Shengpei, et al. Comparison of soil fertility and physical properties of farmland, wasteland and returning farmland to forest in Minqin Oasis[J]. Soils, 2011, 43(3):398 －405.]

[9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2005. [BAO Shidan. Soil agro-chemistrical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.]

[10] 崔向慧. 干旱半干旱沙区人工植被与土壤水分环境相互作用关系研究进展[J]. 世界林业研究,2010,23(6):50 －54. [CUI Xianghui. Research advances in the interaction relationships between artificial vegetations and soil moisture in arid and semi-arid sandy regions of China[J]. World Forestry Research, 2010, 23(6):50 －54.]

[11] 徐炳成,山仑,陈云明. 黄土高原半干旱区植被建设的土壤水分效应及其影响因素[J]. 中国水土保持科学,2003,1(4):32 －35. [XU Bingcheng, SHAN Lun, CHEN Yunming. Review and discuss on the effect and influence factors of vegetation construction on soil water in semi-arid area on Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, 1(4):32 －35.]

[12] 韩姣姣,段旭,赵洋毅. 金沙江干热河谷不同植被坡面土壤水分时空分布特征[J]. 干旱区地理,2019,42(1):123 －131. [HAN Jiaojiao, DUAN Xu, ZHAO Yangyi. Spatial and temporal variability of soil moisture on slope land of different vegetation of dry-hot valley in Jinsha River[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1):123 －131.]

[13] 郭全恩,王益权,马忠明,等. 植被类型对土壤剖面盐分离子迁移与累积的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(13):2711 －2720. [GUO Quan'en, WANG Yiquan, MA Zhongming, et al. Effect of vegetation types on soil salt ions transfer and accumulation in soil profile[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(13):2711 －2720.]

[14] 陈有君,红梅,李绍良,等. 浑善达克沙地不同植被下的土壤水分状况[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(1):68 －73. [CHEN Youjun, HONG Mei, LI Shaoliang, et al. Soil water regime under different plant coverage in Hunshandake sand land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(1):68 －73.]

[15] 张勃,孟宝,郝建秀,等. 干旱区绿洲—荒漠带土壤水盐异质性及生态环境效应研究——以黑河中游张掖绿洲为例[J]. 中国沙漠,2006,26(1):81 －84. [ZHANG Bo, MENG Bao, HAO Jianxiu, et al. Heterogeneity of soil moisture and salt contents and its eco-environmental effects in oasis-desert belt in arid zone[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(1):81 －84.]

[16] 贾宝全,慈龙骏,蔡体久,等. 绿洲—荒漠交错带环境特征初步研究[J]. 应用生态学报,2002,13(9):1104 －1108. [JIA Baoquan, CI Longjun, CAI Tijiu, et al. Preliminary research on environmental characteristics of oasis-desert ecotone[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(9):1104 －1108.]

[17] 曹稳根. 安徽淮北地区盐碱土的成因及其改良措施[J]. 淮北师范大学学报(自然科学版),1997,(1):73 －76. [CAO Wengen. Exploring the formed factors and improved measures of saline-alkai soil in Huaibei area in Anhui[J]. Journal of Huaibei Coal Mining Teachers College, 1997, (1):73 －76.

[18] 李慧芳. 敦煌绿洲胡杨林土壤水盐特征研究[D]. 兰州:西北师范大学,2008. [LI Huifang. Study on characteristics of soil moisture and salinity in Dunhuang Oasis[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2008.]

[19] 王丹丹,于志同,程猛,等. 渭干河绿洲不同土地利用类型土壤盐分的变化特征分析[J]. 干旱区地理,2018,41(2):132 －140. [WANG Dandan, YU Zhitong, CHENG Meng, et al. Characteristics of soil salinity under different land use types in Weigan River Oasis[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2):132 －140.]

[20] 安乐生. 黄河三角洲地下水水盐特征及其生态效应[D]. 青岛:中国海洋大学,2012. [AN Lesheng. Water-salt characteristics of groundwater and ecological effects in the Yellow River Delta[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.]

[21] 赵可夫,范海. 盐生植物及其对盐渍生境的适应生理[M]. 北京:科学出版社,2005. [ZHAO Kefu, FAN Hai. Halophytes and their adaptation to saline habitats[M]. Beijing: Science Press, 2005.]

[22] NIELSEN D R, BOUMA J. Soil spatial variability[M]. Wageningen: PUDOC, 1985:2 －30.

[23] 王云权. 腾格里沙漠边缘不同土壤类型水盐运移规律与数值模拟研究[D]. 兰州:兰州大学,2011. [WANG Yunquan. The simulation of water and salt transport in different doil at the edge of Tengger Desert[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.]

[24] 沈浩,吉力力・阿不都外力. 玛纳斯河流域农田土壤水盐空间分布特征及影响因素[J]. 应用生态学报,2015,26(3):769 －776. [SHEN Hao, ABUDUWAILI Jilili. Spatial distribution of soil moisture and salinity and their influence factors in the farmland of Manas River catchment, northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3):769 －776.]

[25] 赵华,马金珠,朱高峰,等. 甘肃省民勤盆地地下水环境变化及原因探讨[J]. 干旱区研究,2004,21(3):210 －214. [ZHAO Hua, MA Jinzhu, ZHU Gaofeng, et al. Study on the change of the groundwater environment and its causes in the Minqin Basin, Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2004, 21(3):210 －214.]

[26] 卢响军,武红旗,张丽,等. 不同开垦年限土壤剖面盐分变化[J]. 水土保持学报,2011,25(6):229 －232. [LU Xiangjun, WU Hongqi, ZHANG Li, et al. Changes of soil profile salt on different reclaimed years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6):229 －232.]

[27] 杨劲松,姚荣江,刘广明,等. 黄河三角洲地区土壤盐分的空间变异性及其 CoKriging 估值[J]. 干旱区研究,2006,23(3):439 －445. [YANG Jinsong, YAO Rongjiang, LIU Guangming, et al. Spatial variability of soil salinity in the Yellow River Delta and its estimation by CoKriging method[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(3):439 －445.]

[28] PECK A J. Note on the role of a shallow aquifer in dryland salinity[J]. Soil Research, 1978, 16(2):237 －240.

[29] 王雪梅,康璇,赵枫,等. 不同土地利用方式下渭—库绿洲土壤盐渍化特征分析[J]. 水土保持研究,2016,23(1):160 －164.

[WANG Xuemei, KANG Xuan, ZHAO Feng, et al. Analysis on characteristics of soil salinization in the Weigan Kuqa River delta oasis under different land use patterns[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 160 – 164.]

[30] 张冈,周志宇,张彩萍. 利用方式对盐渍化土壤中有机质和盐分的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(4): 15 – 20. [ZHANG Gang, ZHOU Zhiyu, ZHANG Caiping. The effect of land use on the levels of salt and organic matter in saline soil[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2007, 16(4): 15 – 20.]

[31] 邹晓霞,王维华,王建林,等. 垦殖与自然条件下黄河三角洲土壤盐分的时空演化特征研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 309 – 316. [ZOU Xiaoxia, WANG Weihua, WANG Jianlin, et al. Time-spatial revolution characteristics of soil salinity in the Yellow River Delta under different land cultivation and natural conditions [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 309 – 316.]

[32] 张鹏锐,李旭霖,崔德杰,等. 滨海重盐碱地不同土地利用方式的水盐特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 117 – 121. [ZHANG Pengrui, LI Xulin, CUI Dejie, et al. Charcteristics of water and salt under different land use in heavy coastal saline-alkaline land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 117 – 121.]

Spatial distribution characteristics of soil water and salt under different land use types in Minqin Oasis

LIU Fei, CHEN Pei-yuan, YU Hai-chao, MA Jin-zhu

(*Key Laboratory of Western China's Environmental System (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*)

Abstract: In the Minqin area, Gansu Province, China, the climate is dry, water resources are scarce, and the ecology is fragile. Over the long history of human development, the land use types and spatial structures of the oasis have undergone many changes, which in turn have affected the stability of the oasis-desert ecosystem. The soil water and salt characteristics have resulted from the combined effects of local natural conditions (e. g., climate, topography, hydrogeology, and vegetation) and human activities (e. g., unreasonable irrigation systems, overgrazing, and large reclamation). Unreasonable distribution of soil water and salt will directly lead to soil salinization and even to desertification, which will seriously affect the living environment and human living conditions. Therefore, preventing soil salinization and protecting existing land resources are important tasks for the sustainable development of human society. This study takes the downstream area of the Shiyang River Basin, Minqin Oasis, as a research area; through field sampling, field investigation, and experimental analysis, it is understood that there are significant differences in the soil water and salt characteristics for different land use types. The soil moisture content is generally low and ranges 5.35% – 20.58%. The average salt content is 47.02 $g \cdot kg^{-1}$ and the degree of salinization is severe. Both the soil water and salt contents are moderately variable, thus indicating that they are susceptible to climate, topography, hydrogeology, and human activities. The vertical distribution of soil water and salt under different land use types is significantly different. The variations of soil water content in the vertical direction are more complicated but the salt content mainly appears as "surface accumulation" and "oscillating" in the vertical direction. The degree of variation in soil salinity is obviously greater than the degree of variation of water content. This indicates that the spatial dependence of soil salinity is greater than the soil moisture content. The variations of surface soil water and salt are larger, indicating that the surface soil water and salt levels are susceptible to external factors (such as climate, terrain, and human activities). However, as the depth of the soil layer increases, the effect of external factors gradually weakens, thus resulting in a gradual decrease in the intensity of the variations in soil water and salt levels in the vertical direction. The spatial distribution of soil water and salt in each soil layer in the study area is in the form of strips. The soil moisture content of Minqin Oasis is generally high in the west, low in the east, high in the south, and low in the north, while the soil salinity shows a trend of high in the north, low in the south, high in the east, and low in the west.

Key words: Minqin Oasis; soil moisture; soil salinity; spatial distribution